

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่าง เหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

A STUDY OF FACTORS AFFECTING ON SHEAR STRENGTH BETWEEN STAINLESS STEEL AND LEAD-FREE SOLDER

อรจิตร แจ่มแสง* ปิยะวรรณ สุนาสวน นิวัฒน์ มูแกม
Orajit Jaemsang*, Piyawan Sunasuan, Niwat Mookam

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kang Won Campus.

*Corresponding author, E-mail: orajit.pra@rmutr.ac.th, nid_orajit@hotmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของบทความฉบับนี้เพื่อกำหนดตัวแปรกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการบัดกรีระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu เมื่อกำหนดตัวแปรคือ ระยะต่อเกย พื้นผิวของโลหะพื้นและระยะห่างระหว่างชิ้นงาน เมื่อผลตอบสนอง คือ ความต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อ ในการทดลองใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาคุชิสำหรับเลือกตัวแปรการบัดกรีที่เหมาะสม จากการทดลองผลพบว่า ตัวแปรการบัดกรีส่งผลกระทบต่อความต้านทานแรงเฉือนโดยตัวแปรการบัดกรีที่เหมาะสมได้จากการกำหนดระยะต่อเกย 10 มิลลิเมตร พื้นผิวของโลหะพื้นที่ 600 กริต ระยะช่องว่าง 0.3 มิลลิเมตร ผลการทำนายปรากฏว่ามีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 107.89 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และจากการทดลองยืนยันผลจากการทำนายตัวแปรที่เหมาะสมมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 3.50%

คำสำคัญ: โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว โลหะเติม ความต้านทานแรงเฉือน เหล็กกล้าไร้สนิม

Abstract

This paper aims to determine the parameters of appropriate process on soldering between AISI 304 stainless steel and Sn-0.3Ag-0.7Cu lead-free solder. The parameters determined in this study were lap joint, base metal surface and the space of each work piece whereas the responses were shear resistance of joint. In this study, Taguchi method was used as experimental design technique for selecting optimized soldering parameters. The findings reveal that soldering parameters influencing the shear resistance. Moreover, the optimal soldering parameters were determined from the clearance of lap joint 10 mm, base metal surface was 600 grids, and the clearance was 0.3 mm. In addition, the result of From there it appears that the prediction value of maximum shear resistance 107.89 Newton per square millimeter.

prediction reveals that the value of maximum shear resistance was 107.89 N/mm². Finally, this study had also been verified that the result of prediction error was less than 3.50%.

Keywords: Lead-Free Solder, Filler Metal, Shear Strength, Stainless Steel.

บทนำ

โลหะบัดกรีนิยมนำมาเป็นโลหะเติม (Filler Metal) ระหว่างรอยต่อของโลหะพื้นสำหรับนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งโลหะบัดกรีชนิดตะกั่วและดีบุก (Sn-Pb Solder) นอกจากจะใช้ในการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผ่นบอร์ดแล้วยังสามารถใช้สำหรับประสานรอยต่อชนิดอื่นๆ ได้อีกด้วย เนื่องจากมีจุดเด่นด้านการบัดกรีที่ดี อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่เหมาะสม มีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดีตลอดจนเป็นโลหะเติมที่มีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตามโลหะบัดกรีชนิดนี้ยังคงมีความเป็นพิษเนื่องจากมีตะกั่วผสมอยู่ในปริมาณสูงสำหรับส่วนผสมที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ Sn-37Pb และ Sn-40Pb เป็นต้น [1-3] ดังนั้นเพื่อป้องกันอันตรายจากตะกั่วจึงมีการนำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว (Lead-Free Solder) มาใช้แทนโลหะบัดกรีชนิดดีบุก-ตะกั่ว ด้วยในปัจจุบันมนุษย์เราหันมาให้ความสำคัญในเรื่องสุขภาพกันมากขึ้น วิธีที่ทำให้มีสุขภาพที่ดีมีด้วยกันหลายวิธีหนึ่งในนั้นก็คือ การบริโภคอาหารที่สะอาดปราศจากสารปนเปื้อน ซึ่งอาหารสามารถเกิดการปนเปื้อนได้โดยตรงจากการประกอบอาหาร สารปนเปื้อนที่อันตรายตัวหนึ่งก็คือ ตะกั่วที่มีอยู่ เช่น ในท่อน้ำ ภาชนะบรรจุอาหาร (Food Packaging) หรือเครื่องใช้ในครัวเรือน (Kitchen Articles) [4] ซึ่งการปนเปื้อนของตะกั่วเกิดจากการละลายของตะกั่วที่อยู่ในรูปของไอออนโลหะสามารถออกจากแนวการบัดกรีเข้าสู่สารละลายที่สัมผัสโดยตรงกับตะกั่ว เช่น น้ำ ซึ่งการละลายดังกล่าวจะค่อยๆ ดำเนินไปอย่างไรก็ตามการละลายของตะกั่วจะเกิดขึ้น

ในอัตราเร็วเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปัจจัยของสิ่งแวดล้อมมาเป็นตัวกระตุ้น เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่มปริมาณเกลือในน้ำ นอกจากนี้การนำตะกั่วซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าต่ำมาสัมผัสโดยตรงกับสแตนเลสซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจะทำให้เกิดการเร่งการละลายของตะกั่วหรือเกิดการกัดกร่อนที่เรียกว่า การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) ทำให้กระทรวงสาธารณสุขได้กำหนดปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วในอาหารได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุต้องมั่นใจว่าส่วนประกอบของภาชนะบรรจุอาหารซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายลงสู่อาหารต้องอยู่ในปริมาณที่ปลอดภัย [5-8] ในปัจจุบันโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่สามารถนำมาใช้ทดแทนโลหะบัดกรีดั้งเดิมที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมซึ่งอยู่ในรูปแบบโลหะผสม (Alloy) มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Bi, Sn-In และ Sn-Ag-Cu เป็นต้น สำหรับโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่นิยมใช้กันมาก คือ โลหะบัดกรีในกลุ่ม Sn-Ag-Cu (SAC) ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีที่มีคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการบัดกรีที่ดีกว่า อีกทั้งยังมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะบัดกรีที่มีตะกั่วผสมอยู่ [9-10] อย่างไรก็ตามนอกจากองค์ประกอบทางเคมีของโลหะเติมแล้วมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของรอยต่อบัดกรีจากปัจจัยต่างๆ ที่สามารถควบคุมได้ เช่น ระยะเวลาการเย็น อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการบัดกรี เป็นต้น [11-14]

ในงานวิจัยนี้จึงนำโลหะผสม Sn-0.3Ag-0.7Cu ซึ่งเป็นโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วในกลุ่ม SAC ที่มีเงินผสมอยู่น้อยมาใช้เป็นโลหะเติมเพื่อทำการศึกษาปัจจัยในการบัดกรี ได้แก่ ระยะต่อเกย พื้นผิวของโลหะพื้นและระยะห่างระหว่างชิ้นงานที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยการบัดกรีในเตาอบ (Furnace Soldering) เมื่อออกแบบและทดลองด้วยวิธีทาคุชิ (Taguchi Methodology) เพื่อกำหนดตัวแปรที่เหมาะสมกับกระบวนการบัดกรีจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน หรือ S/N-ratios ที่มีค่าตอบสนองที่มากที่สุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ (1) เพื่อศึกษาค่าความต้านทานแรงเฉือนของรอยบัดกรีที่เกิดจากการเติมโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu ระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะต่อเกย พื้นผิวของโลหะพื้นระยะห่างระหว่างชิ้นงานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยบัดกรีในแง่ของความ

ต้านทานแรงเฉือน และ (3) เพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงเฉือนสำหรับการต่อเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการบัดกรี

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทาคุชิ จากการกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 1 ได้แก่ ระยะต่อเกย ระยะห่างระหว่างชิ้นงานหรือช่องว่างของรอยต่อซึ่งกำหนดด้วยเส้นลวดขนาดต่างๆ ตามกำหนดและความหยาบผิวของโลหะพื้นจากการขัดผิวด้วยกระดาษทรายที่มีขนาดกริตแตกต่างกันบนเครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1 ชิ้นงานโลหะพื้นที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2 นำมาตัดให้ได้ขนาด 25.4x114.3x2 มิลลิเมตร ก่อนการบัดกรีทำความสะอาดผิวโลหะพื้นโดยใช้สารละลายกรดไนตริก (Nitric Acid) ผสมเอทานอล (Ethanol) และปล่อยให้แห้งในอากาศ

ตารางที่ 1 ปัจจัยในการทดลองและระดับของปัจจัย

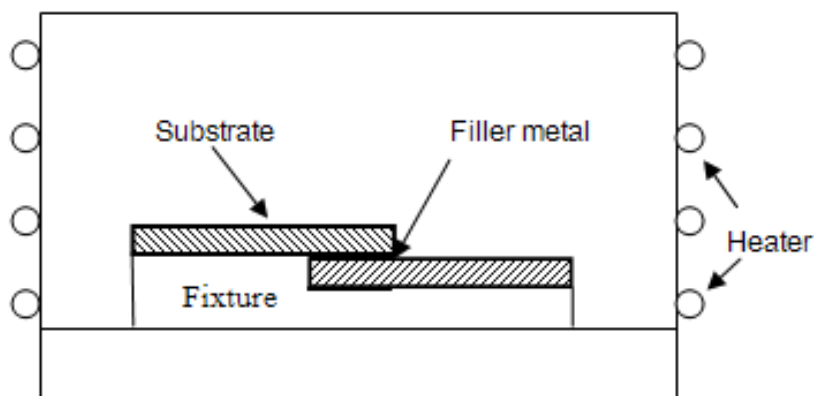
ปัจจัยในการทดลอง	ระดับของปัจจัย			
	1	2	3	4
ระยะต่อเกย (มิลลิเมตร)	4	6	8	10
ความหยาบผิว (กริต)	400	600	800	1,000
ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	0.1	0.2	0.3	0.4

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [15]

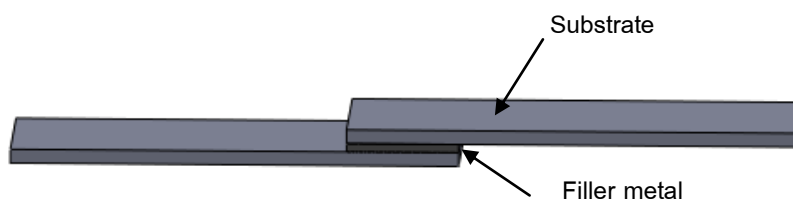
ส่วนประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt))								
Cr	Ni	Mn	Si	Mo	C	S	P	Fe
17.960	9.210	1.060	0.640	0.090	0.025	0.020	0.005	Bal.

ขั้นตอนการบัดกรีนำโลหะพื้นที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจุ่มลงในฟลักซ์ SS-204 เพื่อให้โลหะพื้นมีความสามารถในการบัดกรีดีขึ้น จากนั้นจึงทำการติดตั้งโลหะพื้นลงบนอุปกรณ์จับยึดที่เตรียมไว้เพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1002 - 05 สำหรับโลหะพื้นที่ติดตั้งลงบนอุปกรณ์จับยึดเมื่อสอดแผ่นโลหะเติมที่ระหว่างรอยต่อแล้วถูกนำเข้าไปในเครื่องให้ความร้อนซึ่งจะกำหนดอุณหภูมิในการบัดกรีที่ 300°C ใช้เวลาในการบัดกรีที่ 10 นาที โลหะเติมจะหลอมละลายแล้วค่อยๆ ไหลเข้าไปในช่องว่างระหว่างชิ้นงานโดยอาศัยแรงดึงดูดตามรูเล็ก (Capillary Force) จนเต็ม ทั้งนี้แผนภาพวิธีการบัดกรีในเตาแสดงดังภาพที่ 1 จากนั้นจึงนำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานออกจากเครื่อง

ให้ความร้อน เมื่อชิ้นงานตัวอย่างเย็นตัวในอากาศจึงทำการถอดชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรีออกจากอุปกรณ์จับยึด ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างสำหรับนำไปทดสอบความต้านทานแรงเฉือนแสดงดังภาพที่ 2 ในการทดลองจะทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเงื่อนไขตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้จนครบทั้ง 16 เงื่อนไขและทดลองซ้ำเงื่อนไขละ 2 ตัวอย่าง หลังการบัดกรีนำตัวอย่างมาทดสอบความต้านทานแรงเฉือนด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z020 โดยให้แรงดึงในลักษณะการเฉือน ชิ้นงานขาดออกจากกันด้วยความเร็วในการทดสอบที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที จึงนำค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์ผลเพื่อกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมกับการบัดกรี



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงการบัดกรีในเตาอบ

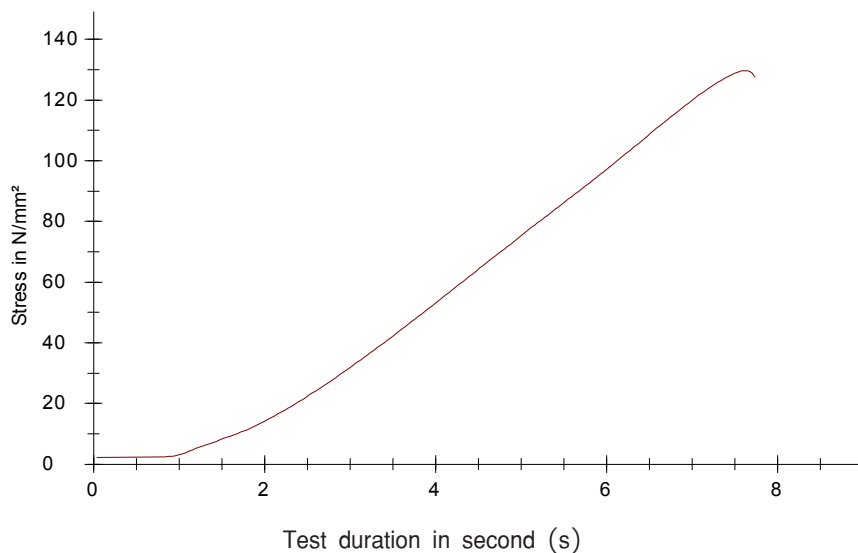


ภาพที่ 2 ชิ้นงานที่ผ่านการบัดกรี

ผลการวิจัย

เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 นอกจากองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก (Fe) ยังมีธาตุโครเมียม (Cr) ผสมอยู่มาก ในการบัดกรีเมื่อนำโลหะบัดกรีที่มีความเข้มข้นของดีบุก (Sn-Base Solder) มาใช้เป็นโลหะเติม โลหะพื้นที่สัมผัสกับโลหะบัดกรีซึ่งอยู่ในสภาวะของเหลวที่ระหว่งรอยต่อนอกจากสารประกอบเชิงโลหะ Fe-Sn แล้วยังสามารถเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิด (Fe, Cr) Sn₂ ได้ เช่น จากการบัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับดีบุกบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 240°C สามารถเกิดชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Fe, Cr) Sn₂ ที่มีความหนาเฉลี่ยได้ถึง 10 ไมโครเมตร และในกรณีใช้สังกะสี (Zn) เป็นโลหะเติมนอกจากจะเกิดเฟส Fe-Zn แล้วยังสามารถเกิดเฟส (Fe, Cr) Zn₁₀ และเฟส (Fe, Cr) Zn₁₃ [15] อย่างไรก็ตามในการทดลองใช้โลหะผสมที่มีดีบุกผสมอยู่ถึง 99.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจะใกล้เคียงกับการใช้ดีบุกบริสุทธิ์จึงยากที่จะเกิดสารประกอบเชิงโลหะที่มีองค์ประกอบทางเคมีของเงินและทองแดง (Ag-Cu) ที่มีอยู่ในโลหะผสม เนื่องจากมีองค์ประกอบ

ทางเคมีของทั้งสองธาตุเพียง 0.3 และ 0.7%wt สำหรับเงินและทองแดงตามลำดับ เมื่อตรวจสอบโดยใช้สมดุลเฟสของ Fe-Ag และ Fe-Cu สำหรับชั้นปฏิกริยามีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการต่อเนื่องจากการแพร่ระหว่างอะตอม (Interdiffusion) จากการแพร่ของ Cu, Fe, Cr และ Ni แต่สำหรับการแพร่ของ Cu และ Ni สามารถแพร่ได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Fe และ Cr [16] จากการแพร่ของธาตุอุณหภูมิที่ใช้จึงเป็นอีกปัจจัยในกระบวนการที่สำคัญ โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้นเช่นกัน [17] โดยธรรมชาติชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นที่ระหว่งรอยต่อจะมีความเปราะและส่งผลต่อสมบัติทางกลได้ สำหรับตัวอย่างผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนที่ตรวจสอบในการทดลองแสดงดังภาพที่ 3 ผลการทดลองตามเงื่อนไขที่มีการกำหนดไว้ภายใต้ปัจจัยและระดับต่างๆ ข้อมูลความต้านทานแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองนำมาหาค่าเฉลี่ยสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงได้ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Test duration ของระยะต่อเกย 10 มิลลิเมตร ความหนาผิว 800 กริต และระยะช่องว่าง 0.2 มิลลิเมตร

ค่าความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยจากการทดสอบจะนำมาใช้ในการหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (The signal-to-noise ratios; S/N-ratios) ซึ่งค่า S/N-ratios จะเป็นชนิดค่าตอบสนองที่มากที่สุด คือ ค่าที่ดีที่สุด (The larger – the – better type problem) เนื่องจากต้องการให้ความต้านทานแรงเฉือนของตัวอย่างมีค่ามาก ดังนั้น S/N-ratios แต่ละการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^n \frac{1}{y_j^2}\right) \quad (1)$$

เมื่อ S/N คือ อัตราส่วนของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละการทดลอง n คือ จำนวนการทดลอง และ y_j คือ ค่าตอบสนอง (Respond) ในแต่ละการทดลอง

จากนั้นจึงทำการประมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยใช้การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ANOM (The Analysis of Means) สำหรับ L16 โดยค่าเฉลี่ยรวมของ S/N ratios ในการทดลองจะได้มาจากการ

$$\overline{S/N} = \frac{1}{16} \left(\sum_{i=1}^n \frac{S}{N_i} \right) \quad (2)$$

จากผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยนั้น ค่า S/N-ratios เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมแสดงถึงผลของแต่ละระดับปัจจัยควบคุม ถ้าค่า S/N-ratios เฉลี่ยของระดับของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามาก หมายถึง ระดับของปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานแรงเฉือนมาก ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาค่า S/N-ratios เฉลี่ยของระยะต่อเกย ในตารางที่ 4 จะพบว่าที่ระดับ 4 จะมีค่า S/N-ratios เฉลี่ยมากที่สุด หมายความว่าถ้าใช้ระยะต่อเกยที่ระดับ 4 เป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองจะมีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงเฉือนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะต่อเกยที่

ระดับ 1, 2 และ 3 เป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเดียวกัน ส่วนความหนาผิวและระยะช่องว่างที่มีค่า S/N ratios เฉลี่ยมากที่สุด คือ ระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4 ผลกระทบของปัจจัยซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์และอิทธิพลของระดับต่างๆ ของปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N-ratios เฉลี่ยของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu พบว่า เงื่อนไขของแต่ละปัจจัยที่ให้ค่า S/N-ratios เฉลี่ยมากที่สุดคือที่ระยะต่อเกยที่ 10 มิลลิเมตร ความหนาผิว 600 กริต และระยะช่องว่าง 0.3 มิลลิเมตร จะมีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงเฉือนดีที่สุด

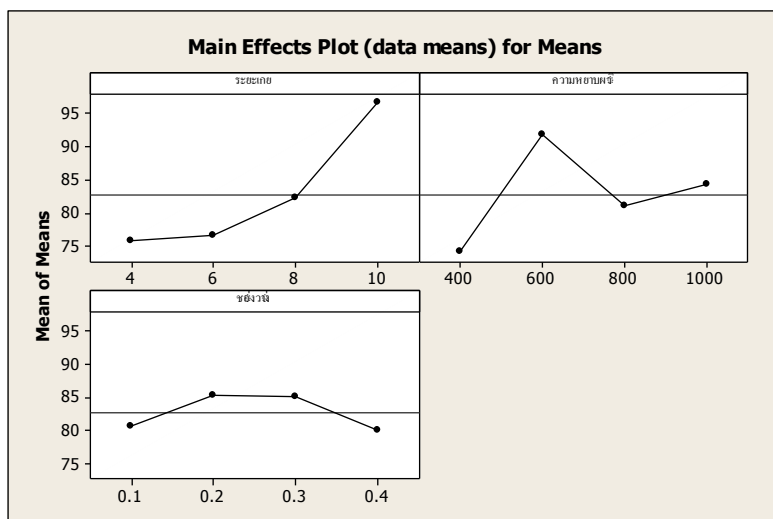
ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยและค่า S/N-Ratio จากการทดลอง

ลำดับ การ ทดลอง	ระยะต่อเกย (มิลลิเมตร)	ความหนาผิว (กริต)	ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	ความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ย (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)	S/N Ratio
1	4	400	0.1	62.65	35.94
2	4	600	0.2	76.07	37.62
3	4	800	0.3	81.98	38.27
4	4	1,000	0.4	82.38	38.32
5	6	400	0.2	67.68	36.61
6	6	600	0.1	99.66	39.97
7	6	800	0.4	54.76	34.77
8	6	1,000	0.3	83.99	38.48
9	8	400	0.3	79.15	37.97
10	8	600	0.4	96.48	39.69
11	8	800	0.1	71.42	37.08
12	8	1000	0.2	81.75	38.25
13	10	400	0.4	86.79	38.77
14	10	600	0.3	95.01	39.56
15	10	800	0.2	115.84	41.28
16	10	1,000	0.1	88.80	38.97

ตาราง 4 ค่า S/N ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ค่า S/N Ratio เฉลี่ย			
	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4
ระยะต่อเกย (มิลลิเมตร)	37.54	37.46	38.25	39.64*
ความหนาผิว (กริต)	37.32	39.21*	37.85	38.50
ระยะช่องว่าง (มิลลิเมตร)	37.99	38.44	38.57*	37.89

* คือ ระดับปัจจัยที่ให้ค่าเหมาะสม



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N-ratio เฉลี่ย

จากการทำนายผลการทดลองโดยวิธีทาคุชิ โดยใช้ปัจจัยการทดลองที่ดีที่สุด คือ ระยะต่อ เกย 10 มิลลิเมตร ความหนาผิว 600 กริต ระยะช่องว่าง 0.3 มิลลิเมตร ผลการทำนายปรากฏว่ามีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 107.89 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร มีค่า S/N ratio 40.98 และเมื่อทำการยืนยันผล (Confirmation Test) การทำนายโดยการทดลองที่ปัจจัยดังกล่าวพบว่า รอยต่อจากการบัดกรีมีค่าความความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 104.16 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร โดยมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 3.46% เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการทำนาย ดังนั้น ในการออกแบบรอยต่อตลอดจนการเตรียมพื้นผิวของโลหะพื้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับ ออกแบบให้รอยต่อมีความแข็งแรงเนื่องจาก ส่งผลต่อการเปียก (Wetting) การกระจายตัว (Spreading) และ Capillary Action ของโลหะ เดิมในการบัดกรี [18] ถึงแม้ในงานวิจัยของ Zang และคณะ [19] ได้แสดงให้เห็นสภาวะการเปียกของโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วที่มีความเข้มข้นของ ดีบุกบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในช่วง อุณหภูมิ 503-673 K (230-400°C)

การยึดติดของโลหะบัดกรีจะด้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะพื้นทองแดงและนิกเกิล เนื่องจากมุมสัมผัสของเหลวมีค่าน้อยมาก แต่สำหรับเทคนิคการบัดกรีในเตาเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการบัดกรีที่ให้ความแข็งแรงสูงเนื่องจาก สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เปลวไฟและอินฟราเรด [20]

สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่วโดยกำหนดระยะต่อเกยที่ 4, 6, 8, และ 10 มิลลิเมตร ความหนาผิวของโลหะพื้นที่ 400, 600, 800, และ 1,000 กริต และระยะช่องว่างที่ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 มิลลิเมตร ปัจจัยการทดลองที่ดีที่สุดคือ ระยะต่อเกย 10 มิลลิเมตร ความหนาผิว 600 กริต ระยะช่องว่าง 0.3 มิลลิเมตร จากการทำนายผลมีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด 107.89 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และจากการทดลองยืนยันผลการทำนายมีค่าความความต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 104.16 นิวตัน

ต่อตารางมิลลิเมตร โดยมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 3.46% อย่างไรก็ตามการใช้วิธีทางสถิติช่วยในการกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมจะมีข้อดีคือ ง่ายในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลโดยไม่ต้องใช้การแจกแจงทางสถิติและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ตลอดจนไม่ต้องทำซ้ำจึงมีจำนวนการทดลองน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ เช่น การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial) เหมาะกับการศึกษาผลกระทบหลักแต่มีโครงสร้างซับซ้อนกับผลกระทบ

ของปัจจัยและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยจึงเหมาะกับการคัดปัจจัยทิ้ง (Screening Factors) ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ศึกษาไว้เฉพาะผลกระทบของปัจจัยหลักเท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ตามสัญญาเลขที่ Social 001/2557

เอกสารอ้างอิง

- [1] Joseph R. Davis; and Kelly Ferjutz. (1993). *Welding Brazing and soldering V 6*. Publisher: ASM International.
- [2] Abtew, M.; and Selvaduray, G. (2000, May). Lead-free Solders in Microelectronics. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 27(5-6): 95-141.
- [3] Chellai, T. Kumar, G. K.; and Prabhu, K.N. (2007, September). Effect of thermal contact heat transfer on solidification of Pb-Sn and Pb-free solders. *Materials and Design*. 28(3): 1006-1011.
- [4] Islam, R.A. Chan, Y.C. Jillek, W.; and Islam, S. (2006, August). Comparative study of wetting behavior and mechanical properties (microhardness) of Sn-Zn and Sn-Pb solders. *Microelectronics Journal*. 37(8): 705-713.
- [5] Siam stainless. (n.d.). from <http://www.siamstainless.com>
- [6] Science and technology knowledge center. (n.d.). from <http://www.stkc.go.th/stportalDocument/1203063111.html>
- [7] Materials of construction for equipment in contact with food. (2007, January). *Trends in Food Science & Technology*. 18: S40-S50.
- [8] DUFFY, E. HEARTY, A.P. GILSENAN, M.B.; and GIBNEY, M.J. (2006, July). Estimation of exposure to food packaging materials. 1: Development of a food-packaging database. *Food Additives and Contaminants*. 23(6): 623-633.
- [9] กรรณชัย กัลยาศิริ. (2553, มกราคม-เมษายน). การศึกษาอิทธิพลของอินเดียมที่มีต่อจุดหลอมเหลว ความต้านแรงดึงและความแข็งจุลภาคของ โลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว Sn-0.3Ag-0.7Cu. *วารสารการเชื่อมไทย*. (52). 20-24.
- [10] Kim, K.S. Huh, S.H.; and Suganuma, K. (2003, March). Effects of intermetallic compounds on properties of Sn-Ag-Cu lead-free soldered joints. *Journal of Alloys and Compounds*. 352(1-2): 226-236.

- [11] Molleda, F. Molleda, F.J. Carillo, E.; and Mellor, B.G. (2003, December). Soldering of mild steels: functional joints. *Materials Characterization*. 51(5): 285–292.
- [12] Movahedi, M. Kokabi, A.H.; and Madaah Hosseini, H.R. (2009, May). An investigation on the soldering of Al 3003/Zn sheets. *Materials Characterization*. 60(5): 441–446.
- [13] Ding, M. Zhang, P.I. Zhang, Z.Y.; and Yao, S. (2010, February). Direct-soldering 6061 aluminum alloys with ultrasonic coating. *Ultrasonics Sonochemistry*. 17(2): 292–297.
- [14] Nagaoka, T. Morisada, Y. Fukusumi, M.; and Takemoto, T. (2011, September). Selection of soldering temperature for ultrasonic-assisted soldering of 5056 aluminum alloy using Zn–Al system solders. *Journal of Materials Processing Technology*. 9(211): 1534–1539.
- [15] Zhao, Y. Cheng, C.Q. Cao, Z. Y.; and Zhao, J. (2012, December). Interaction of liquid tin and zinc with AISI 304 stainless steel after passivation in air and nitric acid. *Materials Characterization*. 77: 1–9.
- [16] Yuan, X. Tang, K. Deng, Y. Luo, J.; and Sheng, G. (2013, December). Impulse pressuring diffusion bonding of a copper alloy to a stainless steel with/without a pure nickel interlayer. *Materials and Design*. 52: 359–366.
- [17] Wu, X.W. Chandel, H.P.; and Seow, H L. (2001, June). Wide gap brazing of stainless steel to nickel-based superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 113(1–3): 215–221.
- [18] Huang, Y., Gong, J., Shixiong. L., Leng, J.; and Li, Y. (2012, August). Fluxless soldering with surface abrasion for joining metal foams. *Materials Science and Engineering; A*. 552: 283–287.
- [19] Zang, L. Yuan, Z. Xu, H.; and Xu, B. (2011, March). Wetting process and interfacial characteristic of Sn–3.0Ag–0.5Cu on different substrates at temperatures ranging from 503K to 673 K. *Applied Surface Science*. 257(11): 4877–4884.
- [20] Chaves, M. Vermilyea, S.G. Papazoglou, E.; and Brantley, W.A. (1998, June). Effects of three soldering techniques on the strength of high-palladium alloy solder joints. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 79(6): 677–684.